

Расчёт максимальной внутренней эффективности светодиодов

Цюпак Ю.А., к.ф.-м.н., доц.

Мордовский госуниверситет им. Н.П. Огарёва,

г. Саранск, ул. Большевистская, 68 а

Основные энергетические потери светодиода можно свести к потерям по напряжению и к потерям по току. Потери по напряжению происходят на пути к гетеропереходу, в омическом сопротивлении этого пути. Внешне это проявляется в отличии энергии излучаемых квантов ($h\nu$) от ширины энергетической зоны излучающего полупроводника (ΔE), т.е. в повышенном напряжении питания светодиода.

Гораздо больший интерес представляет анализ эффективности инжекционной электролюминесценции по току. Потери энергии по току могут вызываться различными видами безизлучательных переходов: энергетической «лесенкой» примесных уровней в полупроводнике гетероперехода или смещение области рекомбинации в один из металлических электродов, но это более характерно для рекомбинации при $p - n$ переходе, чем в гетеропереходной структуре.

В любом случае, часть носителей заряда рекомбинирует безизлучательно. Очевидно, пределом токовой эффективности является стопроцентная (по току) рекомбинация. А мерой практической эффективности «чипа», светодиода или прибора может служить отношение практической эффективности к предельной.

Представляет интерес расчёт предельной токовой рекомбинации инжекционной электролюминесценции. Её можно определить как равенство пар прорекомбинировавших носителей зарядов и квантов излученного при этом света.

Рассчитаем внутренний выход света в светодиоде в виде отношения светового потока к проходящему электрическому току при условии равенства потребляемой и излучаемой мощности, причём световой поток выразим в квантах/сек, а электрический ток – в виде электронов/сек.

Мощность светового потока Φ равна

$$P_{\lambda} = \frac{1}{683} \Phi_{\lambda} \frac{1}{v_{\lambda}}$$

где Φ_{λ} – световой поток;

v_{λ} – спектральный коэффициент чувствительности зрения;

683 – энергетический эквивалент: $1 \text{ Вт} \left[\frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \right]$.

Энергия одного кванта световой энергии равна (для определённой λ) за 1 сек:

$$\omega_{\lambda} = 1,986/10^{16} \lambda \text{ [Дж]} (\lambda \text{ в нм}).$$

Отсюда мощность светового потока через поток квантов равна

$$P_{\lambda\text{КВ}} = \frac{1}{683} \Phi_{\lambda} \frac{1}{v_{\lambda}} \frac{10^{16} \lambda}{1,986} \left[\frac{\text{КВ}}{\text{ЛМ}} \right]$$

Потребляемая электрическая мощность равна:

$$P_{\text{э}} = U \cdot I.$$

Эта же мощность через поток электронов равна:

$$P_{\text{эл}} = \frac{U \cdot I}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot U} = \frac{I}{1,6 \cdot 10^{-19}}$$

где $1,6 \cdot 10^{-19}$ – заряд электрона, в Кулонах.

В таком случае «токовая» эффективность излучательной рекомбинации по световому потоку при квантовом выходе, равном 1, равна:

$$\frac{\Phi_{\lambda} \cdot 10^{16} \lambda \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{683 \cdot v_{\lambda} \cdot 1,986 \cdot I} = \frac{1,18 \cdot \lambda [\text{нм}]}{v_{\lambda} \cdot \frac{I}{\Phi_{\lambda}} \left[\frac{\text{мА}}{\text{ЛМ}} \right]} = 1$$

Откуда

$$\frac{I}{\Phi_{\lambda}} = \frac{1,18 \cdot \lambda [\text{нм}]}{v_{\lambda}} \left[\frac{\text{мА}}{\text{ЛМ}} \right] \text{ или } \frac{\Phi_{\lambda}}{I} = \frac{v_{\lambda}}{1,18 \cdot \lambda [\text{нм}]} \left[\frac{\text{ЛМ}}{\text{мА}} \right]$$

При этом для зелёного света с $\lambda = 555$ нм:

$$\frac{I}{\Phi_{555}} = 0,66 \text{ мА} / \text{ЛМ} \text{ или } \frac{\Phi_{555}}{I} = 1,51 \text{ ЛМ} / \text{мА}$$

Для белого света при светоотдаче 200 лм/Вт:

$$\frac{I}{\Phi} = 1,85 \text{ мА} / \text{ЛМ} \text{ или } \frac{\Phi}{I} = 0,54 \text{ ЛМ} / \text{мА}$$

где $k = \frac{200}{683}$

Так как светодиоды, в частности светосигнальные, работают в ночное время, параметры их эффективности необходимо учитывать, принимая в расчётах ночную спектральную кривую чувствительности зрения ($v_{\lambda\text{н}}$) с $\lambda_{\text{max}} = 507$ нм и её светоэнергетическим эквивалентом $k = 1700$ лм/Вт. В результате, при тех же подходах можно получить следующие формулы.

Для максимума ночной чувствительности глаза ($\lambda_{\text{max}} = 507$ нм; $v_{\lambda\text{н}} = 1$) при единичном квантовом выходе. При этом ночной световой эквивалент

ночного зрения равен 1700 лм/Вт при $\lambda_{\max} = 507$ нм. Учитывая и «ночные» значения $v_{\lambda\text{H}}$, получаем:

$$\frac{I}{\Phi_{\lambda\text{H}}} = \frac{0,472\lambda(\text{нм})}{v_{\lambda\text{H}}}$$

и в частности, для $\lambda_{\max} = 507$ нм; $v_{\lambda\text{H}} = 1$:

$$\frac{I}{\Phi_{507}} = 0,24 \text{ мА} / \text{лм} ; \frac{\Phi_{507}}{I} = 4,17 \text{ лм} / \text{мА}$$

Как и следовало ожидать, эффективность ночной световой сигнализации по электрическому току значительно возрастает по сравнению с дневной.

Представляется интересным сравнить предельные параметры эффективности различных по цветности и составу светодиодов в разных условиях наблюдения. Результаты этих расчётов представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Предельные значения параметров эффективности светодиодов

Структура		InGaN/AlGaIn/GaN			AlGaP/GaP		Дневной зелёный	Ночной голубой	Белый свет
Длина волны (нм)		451	472	514	573	639	555	507	
Энергия кванта (eV)		2,74	2,6	2,4	2,2	1,95	2,23	2,45	
Дневное зрение	V_{λ}	0,048	0,1	0,6	0,93	0,17	1	0,55	0,29 _Б
	$\frac{\Phi_{\lambda}}{I} \left[\frac{\text{лм}}{\text{мА}} \right]$	0,09	0,18	0,999	1,37	0,226	1,51	0,92	0,54
	$\frac{I}{\Phi_{\lambda}} \left[\frac{\text{мА}}{\text{лм}} \right]$	11	5,55	1,001	0,73	4,43	0,66	1,08	1,85
Ночное зрение	$V_{\lambda\text{H}}$	0,455	0,72	0,96	0,18	0,0015	0,4	1	0,28
	$\frac{\Phi_{\lambda\text{H}}}{I} \left[\frac{\text{лм}}{\text{мА}} \right]$	2,14	3,25	4	0,67	0,005	0,6	4,17	1,35
	$\frac{I}{\Phi_{\lambda\text{H}}} \left[\frac{\text{мА}}{\text{лм}} \right]$	0,47	0,31	0,25	1,5	200	150	0,24	0,74

Необходимо ещё раз подчеркнуть, что полученные значения относятся к внутренним условиям в гетеропереходах полупроводниковых структур. Внешний выход излучения по оптическим условиям даже при световыводящей роли прозрачного корпуса светодиода значительно отличается от внутреннего в меньшую сторону. Тем не менее, можно сравнивать светодиоды по относительному коэффициенту светового выхода по потребляемому току.

$$M_I = \left(\frac{I}{\Phi} \right)_{\text{пред}} / \left(\frac{I}{\Phi} \right)_{\text{практ}} \quad \text{и} \quad M_I = \left(\frac{\Phi}{I} \right)_{\text{практ}} / \left(\frac{\Phi}{I} \right)_{\text{пред}}$$

Динамика последних лет показывает, что эффективность светодиодов неуклонно приближается к предельной.

Приведённые расчёты показывают, что поскольку свет представляет собой зрительное ощущение глаза, зависящее от длины волны и уровня освещённости, то для ночной сигнализации с $\lambda = 507$ нм световой прибор может быть в несколько раз эффективнее, чем для дневной сигнализации с $\lambda = 555$ нм.